

不同空间尺度次暴雨径流侵蚀功率 与降雨侵蚀力的对比研究

鲁克新^a, 李占斌^a, 鞠花^b, 程圣东^a

(西安理工大学 a 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, b 理学院, 陕西 西安 710048)

[摘要] **【目的】**提出径流侵蚀功率的概念,对比分析降雨侵蚀力和径流侵蚀功率在表征次暴雨水力侵蚀动力上的优劣。**【方法】**基于次暴雨洪水过程中径流深和洪峰流量模数 2 个重要的水文特征参数,提出了径流侵蚀功率的概念,并利用岔巴沟流域团山沟径流场和纸坊沟流域 2 个不同空间尺度实测降雨径流泥沙资料,对径流侵蚀功率和降雨侵蚀力表征次暴雨水力侵蚀动力的优劣进行了比较。**【结果】**径流侵蚀功率可以更好地表征坡面和流域尺度的次暴雨水力侵蚀动力,更能体现天然降雨和下垫面特性对次暴雨侵蚀产沙的综合影响。**【结论】**与通用的降雨侵蚀力相比,径流侵蚀功率更适宜用作坡面、流域尺度次暴雨侵蚀产沙模型的侵蚀动力因子。

[关键词] 径流侵蚀功率;降雨侵蚀力;空间尺度;侵蚀动力因子

[中图分类号] S157.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2009)10-0204-05

Study on a comparison of runoff erosion power and rainfall erosivity for single rainstorm event under different spatial scales

LU Ke-xin^a, LI Zhan-bin^a, JU Hua^b, Cheng Sheng-dong^a

(a Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environmental Ecology of Ministry of Education,
b School of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: **【Objective】** The concept of runoff erosion power under single rainstorm event was proposed in the paper, and a comparison of runoff erosion power and rainfall erosivity was conducted. **【Method】** Based on two characteristic values of flood hydrograph under single rainstorm events, i. e. peak discharge modulus and runoff depth, the concept of runoff erosion power under single rainstorm event was proposed in the paper. According to the historically observed data of runoff and sediment under single rainstorm events from Tuanshangou No. 3 runoff plot and Zhifanggou watershed, a comparison of runoff erosion power and rainfall erosivity for determining which could more effectively describe the erosion dynamics of water erosion under single rainfall events was carefully made. **【Result】** The results showed that runoff erosion power could precipitate the integrated effect of rainfall, runoff and underlying surface on hillslope or watershed soil erosion and sediment yield under single rainstorm events. **【Conclusion】** Compared with rainfall erosivity, the proposed runoff erosion power in the paper was more suitable for being the erosion dynamic factor of hillslope and watershed soil erosion models under single rainstorm events.

Key words: runoff erosion power; rainfall erosivity; spatial scale; erosion dynamic factor

土壤侵蚀的产生是多种自然与社会因素共同作用的结果^[1-2],而降雨及其在地表产生的径流是土壤

* [收稿日期] 2009-03-18

[基金项目] 国家自然科学基金项目(40771124);国家重点基础研究发展计划项目(2007CB407206)

[作者简介] 鲁克新(1974—),男,山东新泰人,讲师,博士,主要从事土壤侵蚀与水土保持等研究。E-mail:lkx2942@163.com

侵蚀的主要动力。在国内外比较流行的流域土壤侵蚀模型中,应用最广泛的侵蚀动力因子是降雨侵蚀力(R)。Wischmeier 等^[3-4]于 1959 年明确提出,降雨总动能(E)与最大 30 min 雨强(I_{30})的乘积($E \cdot I_{30}$)是表征降雨侵蚀力(R)的最好指标,并将其应用到美国通用土壤流失预报方程 USLE 及修正的通用土壤流失预报方程 RUSLE 中。随着 USLE 和 RUSLE 在世界各国的广泛推广和应用,许多学者提出了不同形式的 R 指标及 R 值的简易计算方法。从 20 世纪 80 年代初开始,我国的水土保持学者通过各地小区资料的统计分析,也提出了不同形式的降雨侵蚀力指标^[5-9],而王万忠等^[10]在对全国各地降雨径流资料进行综合分析后认为,我国降雨侵蚀力指标采用 $E \cdot I_{30}$ 相对最好。王万忠等^[10]、Foster 等^[11]及 Bagarello 等^[12]的研究表明, $E \cdot I_{30}$ 与雨量(P)和 I_{30} 的乘积($P \cdot I_{30}$)之间高度线性相关,可以采用 $P \cdot I_{30}$ 来精确估算 $E \cdot I_{30}$ 值,从而避免了繁琐复杂的降雨动能计算^[13]。

$E \cdot I_{30}$ 或 $P \cdot I_{30}$ 是 USLE、RUSLE 等流域土壤侵蚀模型中反映水力侵蚀动力的惟一因子,而其仅反映了雨滴击溅对土壤侵蚀的综合效应,并未体现水力侵蚀过程中具有至关重要作用的径流侵蚀和径流输沙的作用。Foster 等^[11]的研究表明,包含雨量、雨强和径流量的综合指标明显较 $E \cdot I_{30}$ 指标好。在 Williams^[14]建立的 MUSLE 模型中,其以径流量和洪峰流速来计算次暴雨侵蚀力;Kinnell 等^[15]在 USLE-M 模型中以径流系数、降雨动能和最大 30 min 雨强等 3 个参数来计算次降雨侵蚀力,与指标 $E \cdot I_{30}$ 相比能更好地模拟预报降雨侵蚀力。

基于次暴雨洪水过程中径流深、洪峰流量模数 2 个重要特征参数,本研究提出了用以描述次暴雨水蚀动力的径流侵蚀功率的概念,并利用坡面和流域 2 个不同空间尺度实测降雨径流泥沙资料,对比分析了降雨侵蚀力和径流侵蚀功率在表征水力侵蚀动力上的优劣,以期对次暴雨侵蚀产沙模型侵蚀动力因子的确定提供参考。

1 材料与方法

次暴雨条件下,流域出口断面的洪水过程是降雨与流域下垫面相互作用的最终体现。径流深 H 和洪峰流量 Q_m 是流域次暴雨洪水过程的 2 个重要水文特征参数,其中 H 代表次暴雨在流域上产生的洪水总量的多少,间接反映了降雨量的大小以及流域下垫面对降雨再分配作用的强弱;而 Q_m 代表了

洪水的强度,间接反映了降雨的时空分布特征和流域下垫面对径流汇流过程的影响。国内外学者一般采用 H 和 Q_m 的组合因子或单因子计算流域的次暴雨产沙量^[16-21]。上述研究表明,无论是径流深和洪峰流量的组合因子还是单因子,它们与流域次暴雨产沙量的相关程度都很高,说明径流深和洪峰流量是流域次暴雨侵蚀产沙的两个重要的侵蚀动力因子。 H 和 Q_m 分别反映了流域次暴雨洪水的某些特性,但均不能反映次暴雨洪水的综合特性,特别是其在侵蚀产沙方面的特征。为消除流域面积的影响,本研究将次暴雨洪水的径流深 H 和洪峰流量模数 Q_m 的乘积作为次暴雨侵蚀产沙的侵蚀动力指标,并令:

$$E = Q_m' H. \quad (1)$$

式中: E 为次暴雨侵蚀产沙动力指标, $m^4/(s \cdot km^2)$; H 为次暴雨平均径流深, m ; Q_m' 为洪峰流量模数, $m^3/(s \cdot km^2)$,其大小等于次暴雨洪水洪峰流量与流域面积的比值。

为了进一步明确 E 的物理含义,可对式(1)进行如下变换:

$$E = Q_m' H = \frac{W}{A} \cdot \frac{Q_m}{A} = \frac{W}{A^2} \cdot A' \cdot \frac{Q_m}{A'} = \frac{A'}{A^2} \cdot W \cdot V = \frac{A'}{\rho g A^2} \cdot \rho g W V = \frac{A'}{\rho g A^2} \cdot F V. \quad (2)$$

令 $Con = \frac{A'}{\rho g A^2}$, 则(2)式可简化为:

$$E = Con \cdot F V. \quad (3)$$

式中: W 为次暴雨的径流总量, m^3 ; A 为流域面积, m^2 ; Q_m 为洪峰流量, m^3/s ; A' 为与 Q_m 对应的流域出口断面的过水面积, m^2 ; V 为流域出口断面与 Q_m 对应的平均流速, m/s ; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; F 为作用力, N 。

从式(3)可以看出,指标 E 具有功率的量纲,它综合表征了流域次暴雨侵蚀产沙过程中径流侵蚀和径流输沙的效率,具有明确的物理内涵,真实反映了不同流域下垫面状况(植被、治理状况等)对降雨径流过程的综合响应。因此,定义指标 E 为径流侵蚀功率。

本研究利用岔巴沟流域团山沟径流场 1963~1969 年实测降雨径流泥沙资料^[22]、纸坊沟流域 1985 年实测降雨径流泥沙资料^[23],在建立降雨侵蚀力(R) (本研究采用 $P \cdot I_{30}$ 指标)、径流侵蚀功率(E) 与次暴雨侵蚀模数(M_s) 之间相关关系的基础上,从坡面和流域两个尺度上,对比分析了降雨侵蚀力

($P \cdot I_{30}$)和径流侵蚀功率(E)在表征次暴雨水力侵蚀动力上的优劣。

2 结果与分析

2.1 坡面尺度

根据团山沟 3 号径流场 1963~1969 年实测 27 场次暴雨的降雨径流泥沙资料,分析得到了各场次暴雨的降雨侵蚀力(R)、侵蚀模数(M_s)以及径流侵蚀功率(E)(表 1),并将降雨侵蚀力(R)与侵蚀模数(M_s)及径流侵蚀功率(E)与侵蚀模数(M_s)的关系点绘在双对数坐标系中,其结果如图 1(a)、(b)所

示。从图 1(a)、(b)中点据的分布情况可以看出,侵蚀模数均随着降雨侵蚀力(R)和径流侵蚀功率(E)的增大而增大,说明侵蚀模数(M_s)与降雨侵蚀力(R)及径流侵蚀功率 E 之间均存在着较好的相关关系。然而,比较两图中点据分布的离散程度可以看出,a 图中点据分布的离散程度较大,而 b 图中点据距分布的离散程度较小,这说明在坡面尺度上次暴雨侵蚀模数(M_s)与径流侵蚀功率(E)之间的相关关系,明显地好于侵蚀模数(M_s)和降雨侵蚀力(R)之间的相关关系。

表 1 团山沟 3 号径流场实测次暴雨洪水计算结果

Table 1 Calculated results of the observed historical single rainstorm floods on Tuanshangou No. 3 runoff plot

洪号 Flood number	降雨侵蚀力/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$) Rainfall erosivity	径流侵蚀功率/ ($\text{m}^4 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) Runoff erosion power	侵蚀模数/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$) Erosion modulus	洪号 Flood number	降雨侵蚀力/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$) Rainfall erosivity	径流侵蚀功率/ ($\text{m}^4 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) Runoff erosion power	侵蚀模数/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$) Erosion modulus
19630615	13.33	0.323 6	5 880	19660815	41.18	0.952 8	12 700
19630826	13.49	0.279 9	10 100	19660828	6.17	0.034 8	617
19630828	2.39	0.033 5	1 040	19670822	3.81	0.049 6	2 760
19630828	6.08	0.060 0	1 710	19670826	18.39	0.097 9	2 380
19640706	18.87	0.012 9	1 520	19680715	27.99	1.200 6	19 600
19640714	6.67	0.039 1	1 600	19680725	37.34	0.131 0	2 500
19640802	20.67	0.681 7	7 530	19690512	5.47	0.016 6	856
19640823	2.00	0.104 3	2 510	19690616	1.39	0.004 3	220
19640911	8.00	0.087 5	1 730	19690714	1.40	0.006 9	452
19660526	37.34	0.173 8	6 540	19690720	7.00	0.018 4	391
19660627	64.47	0.593 5	12 400	19690726	9.34	0.154 9	2 000
19660717a	19.82	0.131 5	5 440	19690809	4.03	0.004 3	149
19660717b	34.61	0.232 0	5 290	19690820	4.85	0.002 6	112
19660808	4.33	0.045 0	826				

注:表中的 19660717a 和 19660717b 分别表示 1966 年 7 月 17 日发生的第 1 场和第 2 场次暴雨洪水。

Note: The flood number of 19660717a and 19660717b means the No. 1 and No. 2 rainstorm flood occurred on July 17, 1966, respectively.

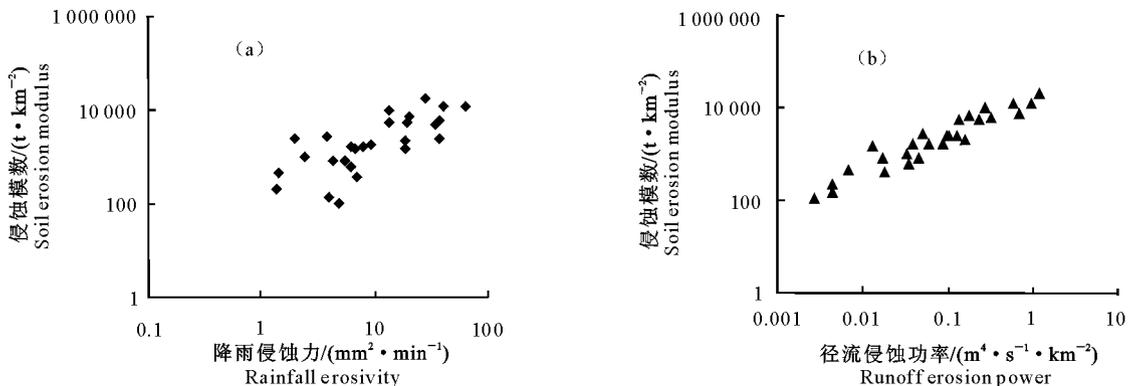


图 1 坡面尺度上次暴雨侵蚀模数与降雨侵蚀力和径流侵蚀功率的关系

Fig. 1 Comparison of the relationships between soil erosion modulus under single rainfall events and rainfall erosivity/runoff erosion power under slope scale

根据实测资料分析成果,经回归分析得到的坡面尺度次暴雨侵蚀模数(M_s)与降雨侵蚀力(R)及径流侵蚀功率(E)之间的回归关系为:

$$M_s = 230.71R^{0.9452}, r^2 = 0.543, n = 27. \quad (4)$$

$$M_s = 15708.0E^{0.7825}, r^2 = 0.910, n = 27. \quad (5)$$

式中: M_s 为坡面次暴雨侵蚀模数, t/km^2 ; R 为降雨

侵蚀力, mm^2/min ; E 为径流侵蚀功率, $\text{m}^4/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。

经分析计算,式(4)和式(5)的 F 检验值分别为 29.7 和 241.7。取 $\alpha = 0.05$,由 F 分布表查得 $F_{0.95}(1,25) = 4.24$,而 $241.7 \gg 29.7 \gg 4.24$,因此,在坡面尺度上,侵蚀模数(M_s)与径流侵蚀功率(E)之间的相关性明显好与其与降雨侵蚀力(R)之间的相关性。

本研究还利用实测次暴雨降雨过程资料及径流泥沙资料,分析了团山沟 7 号和 9 号径流场次暴雨径流侵蚀功率 E 和降雨侵蚀力 R 与对应次暴雨侵

蚀模数 M_s 的相关关系,得到了与 3 号径流场相同的分析结果。

2.2 流域尺度

根据纸坊沟流域把口站 1985 年实测 20 场次暴雨的降雨径流泥沙资料,分析得到了各场次暴雨的降雨侵蚀力(R)、侵蚀模数(M_s)^[23]及径流侵蚀功率(E)如表 2 所示,并将降雨侵蚀力(R)与侵蚀模数(M_s)及径流侵蚀功率(E)与侵蚀模数(M_s)的关系点绘在双对数坐标系中,所得结果如图 2(a)、(b)所示。

表 2 纸坊沟流域实测次暴雨洪水计算结果

Table 2 Calculated results of the observed historical single rainstorm floods in Zhifanggou watershed

洪号 Flood number	降雨侵蚀力/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$) Rainfall erosivity	径流侵蚀功率/ ($10^{-4} \text{m}^4 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) Runoff erosion power	侵蚀模数/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$) Erosion modulus	洪号 Flood number	降雨侵蚀力/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$) Rainfall erosivity	径流侵蚀功率/ ($10^{-4} \text{m}^4 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) Runoff erosion power	侵蚀模数/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$) Erosion modulus
19850526	1.07	0.019 5	1.8	19850816	4.12	7.168 7	381.5
19850614	7.43	7.184 4	283.2	19850826	2.14	0.004 2	0.3
19850617	2.08	0.012 5	3.0	19850828	14.67	19.918 7	1 138.7
19850619	1.79	0.025 3	2.8	19850829	1.22	0.193 1	35.6
19850708	2.23	0.025 9	0.6	19850906	2.53	0.390 7	19.8
19850716	2.32	17.075 0	443.8	19850909	0.72	0.121 8	12.7
19850728	5.93	0.312 1	12.7	19850910	2.09	0.778 2	55.3
19850802	1.36	0.001 3	0.3	19850911	7.65	6.523 8	571.3
19850804	1.32	1.133 3	46.8	19851011	1.92	0.049 3	5.8
19850805	58.95	2 239.304 3	9 091.7	19851019	0.26	0.030 1	1.4

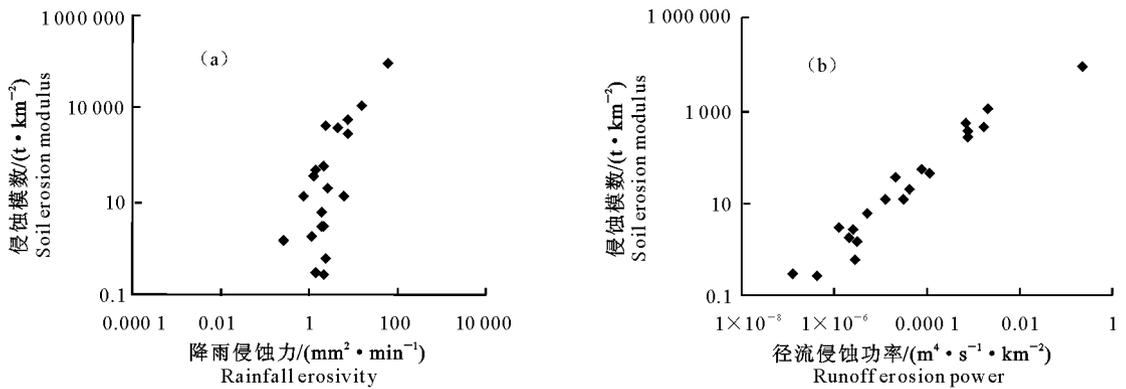


图 2 流域尺度上次暴雨侵蚀模数与降雨侵蚀力和径流侵蚀功率的关系

Fig. 2 Comparison of the relationships between soil erosion modulus under single rainfall events and rainfall erosivity/runoff erosion power under watershed scale

从图 2(a)点据的分布规律可以看出,当降雨侵蚀力(R)小于 $2.2 \text{ mm}^2/\text{min}$ 时,图中点据分布比较分散,侵蚀模数(M_s)随着降雨侵蚀力 R 的变化规律并不明显;而当降雨侵蚀力(R)大于 $2.2 \text{ mm}^2/\text{min}$ 时,侵蚀模数(M_s)随着降雨侵蚀力(R)的增大而增大。与图 2(a)不同的是,图 2(b)中的点据均集中分布于某个狭长区域内,同时,不论径流侵蚀功率(E)大小如何,侵蚀模数(M_s)均随着径流侵蚀功率(E)的增大而增大。分析表明,在流域尺度上,侵蚀模数

(M_s)与径流侵蚀功率(E)之间的相关关系也明显好于侵蚀模数(M_s)和降雨侵蚀力(R)之间的相关关系。

根据实测资料分析成果,经回归分析得到流域尺度次暴雨侵蚀模数(M_s)与降雨侵蚀力(R)及径流侵蚀功率(E)之间的回归关系为:

$$M_s = 3.814 6R^{1.810 8}, r^2 = 0.515 6, n = 20. \quad (6)$$

$$M_s = 92 982.0E^{0.815 4}, r^2 = 0.951 2, n = 20. \quad (7)$$

式中: M_s 为流域次暴雨侵蚀模数, t/km^2 ; R 为降雨

侵蚀力, mm^2/min ; E 为径流侵蚀功率, $\text{m}^4/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。

经计算, 式(6)和式(7)的 F 检验值分别为 19.2 和 351.2。取 $\alpha=0.05$, 由 F 分布表查得 $F_{0.95}(1, 18)=4.41$ 。由于 $351.2 \gg 19.2 > 4.41$, 因此在流域尺度上, 侵蚀模数(M_s)与径流侵蚀功率(E)之间的相关性高于其与降雨侵蚀力(R)之间的相关性, 在其他条件均相同的情况下, 径流侵蚀功率(E)较降雨侵蚀力(R)更适于表征水力侵蚀的侵蚀动力特征。

3 结论与讨论

基于次暴雨洪水过程中径流深和洪峰流量模数 2 个重要特征参数, 本研究提出了用以描述次暴雨水蚀动力的径流侵蚀功率的概念, 并利用岔巴沟流域团山沟径流场和纸坊沟流域 2 个不同空间尺度实测降雨径流泥沙资料, 在建立降雨侵蚀力(R)、径流侵蚀功率(E)与次暴雨侵蚀模数(M_s)之间相关关系的基础上, 对比分析了降雨侵蚀力和径流侵蚀功率在表征水力侵蚀动力上的优劣。本研究表明, 与通用的降雨侵蚀力相比, 径流侵蚀功率可以更好地表征坡面和流域尺度的次暴雨水力侵蚀动力, 更适于综合地体现天然降雨和流域下垫面特性对流域侵蚀产沙的综合影响, 更适宜于作为坡面、流域尺度次暴雨侵蚀产沙模型的侵蚀动力因子。

在今后的研究工作中, 还需要利用更多的坡面、流域不同空间尺度的实测次暴雨降雨径流泥沙资料, 比较径流侵蚀功率和降雨侵蚀力的优劣, 以验证本研究结果的合理性。

[参考文献]

- [1] 陈浩, 蔡强国, 陈金荣, 等. 黄土丘陵沟壑区人类活动对流域系统侵蚀、输移和沉积的影响 [J]. 地理研究, 2001, 20(1): 68-75.
Chen H, Cai Q G, Chen J R, et al. Influence of human activities on erosion, delivery and deposit of basin system in hilly-gully loessic area [J]. Geographical Research, 2001, 20(1): 68-75. (in Chinese)
- [2] 陈浩, 周金星, 陆中臣, 等. 黄河中游流域环境要素对水沙变异的影响 [J]. 地理研究, 2002, 21(1): 179-187.
Chen H, Zhou J X, Lu Z C, et al. Impact of environmental factors on runoff and sediment variations in middle reaches of the Yellow River [J]. Geographical Research, 2002, 21(1): 179-187. (in Chinese)
- [3] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [M]. Washington D C: Agricultural Handbook No. 537, USDA, 1978: 1-58.
- [4] Wischmeier W H. A rainfall erosion index for a universal soil

- loss equation [J]. Soil Science Society Proceedings, 1959, 23(3): 246-249.
- [5] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究. II: 降雨侵蚀力指标 R 值的探讨 [J]. 水土保持通报, 1983, 3(5): 62-64.
Wang W Z. Study on the relationship between rainfall features and soil loss in loess area. II: the analysis on the index of rainfall erosivity (R) [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1983, 3(5): 62-64. (in Chinese)
- [6] 周伏建, 陈明华, 林福兴, 等. 福建省降雨侵蚀力指标的初步探索 [J]. 亚热带水土保持, 1989, 1(2): 23-25.
Zhou F J, Chen M H, Lin F X, et al. A primary study of the index of rainfall erosivity in Fujian Province [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 1989, 1(2): 23-25. (in Chinese)
- [7] 杨子生. 滇东北山区坡耕地降雨侵蚀力研究 [J]. 地理科学, 1999, 19(3): 265-270.
Yang Z S. A study on erosive force of rainfall on sloping cultivated land in the northeast mountain region of Yunnan Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 1999, 19(3): 265-270. (in Chinese)
- [8] 刘文耀. 云南昭通盆地降雨侵蚀性与土壤可蚀性的初步研究 [J]. 云南地理环境研究, 1999, 11(2): 76-82.
Liu W Y. Study on rainfall erosivity and soil erodibility in the Zhaotong basin in Yunnan Province [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 1999, 11(2): 76-82. (in Chinese)
- [9] 陈法扬, 王志明. 通用土壤流失方程在小良水土保持试验站的应用 [J]. 水土保持通报, 1992, 12(1): 23-41.
Chen F Y, Wang Z M. Application of universal soil loss equation at Xiaoliang water and soil conservation experiment station [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1992, 12(1): 23-41. (in Chinese)
- [10] 王万忠, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布 (I) [J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 5-18.
Wang W Z, Jiao J Y, Hao X P, et al. Study on rainfall erosivity in China (I) [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(4): 5-18. (in Chinese)
- [11] Foster G R, Lombardi F, Moldenhauer W C. Evaluation of rainfall runoff erosivity factors for individual storms [J]. Transactions of the ASAE, 1982, 25(1): 124-129.
- [12] Bagarello V, D'Asaro F. Estimation single storm erosion index [J]. Transactions of the ASAE, 1994, 7: 785-791.
- [13] 章文波, 谢云, 刘宝元. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力 [J]. 地理研究, 2001, 21(3): 384-390.
Zhang W B, Xie Y, Liu B Y. Estimation of rainfall erosivity by using rainfall amount and rainfall intensity [J]. Geographical Research, 2001, 21(3): 384-390. (in Chinese)
- [14] Williams J R. Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor [C]//Agricultural Research Service, USDA. Present and prospective technology for prediction sediment yield and sources. Washington D C, USA: U. S. Gov Print Office, 1975: 244-252.